

平成 29 年 6 月 5 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2016

課題番号：24684015

研究課題名(和文) X線に主眼を置いた、広帯域X・ガンマ線観測によるガンマ線バーストの放射機構の解明

研究課題名(英文) Unraveling of radiation mechanisms of gamma-ray bursts with wide-band X and gamma-ray observations mainly focusing on X-ray observations

研究代表者

山岡 和貴 (Yamaoka, Kazutaka)

名古屋大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00365016

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙最大級の爆発現象であるガンマ線バースト(GRB)の放射機構の解明のため、国際宇宙ステーションに搭載された、日本発の観測装置MAXIと新規開発し2015年8月に打ち上げたCALETGRBモニター(CGBM)を用いて、10 keV以下のX線に着目してX線からGeVガンマ線領域に渡る広帯域観測を行った。CGBMは61個のGRB(うちMAXIで4個同時検出)し、重力波対応天体探査を精力的に行った。MAXIも64個のGRB候補をとらえ、半分以上がX線で卓越したX線フラッシュである。中にはX線でソフトでSwift衛星で即時に追観測してもX線対応天体が見つからないものもあり、新種族の天体なのかもしれない。

研究成果の概要(英文)：In order to unravel radiation mechanisms of gamma-ray bursts (GRBs) which is one of the biggest explosion in the Universe, we carried out wide-band observations from X-rays to GeV gamma-rays focusing on X-ray range below 10 keV with MAXI and CALET Gamma-ray Burst Monitor (CGBM) on the International Space Station (ISS) which was successfully launched in August 2015. The CGBM observed 61 GRBs so far (4 GRBs were simultaneously detected by MAXI), and searched for X-ray and gamma-ray counterpart of gravitational wave events. MAXI observed 64 GRB candidates, and more than half of them are classified to X-ray flashes (XRFs) whose radiations are dominant in X-rays. Furthermore, we found that there were some weak events with soft X-ray spectrum and no X-ray counterparts found in the Swift follow-up observation. These events might be a new class for transient sources.

研究分野：X線ガンマ線天文学、宇宙線物理学、放射線検出技術

キーワード：X線ガンマ線天文学、ガンマ線バースト、国際宇宙ステーション、全天X線監視装置(MAXI)、高エネルギー電子、ガンマ線観測装置(CALET)

1. 研究開始当初の背景

宇宙最大級の爆発現象であるガンマ線バースト(GRB)の放射機構は依然謎にまつまれている。これまで GRB の電磁波観測は主に NaI(Tl) などの無機シンチレータを用いて 10 keV から 10 MeV に渡る領域で観測されてきた。1990 年代のコンプトン衛星(米)BATSE は GRB が一様等方的に分布していること、エネルギースペクトルが”バンド関数”と呼ばれる折れ曲がりをもつべき関数で経験的に表されること(Band et al. 1993)などを明らかにし、ジェット中の内部衝撃波で超相対論的速度に加速された電子によるシンクロトロン放射(シンクロトロン衝撃波モデル)という説が有力視されてきた。10 MeV 以上の高エネルギーガンマ線(主に GeV 領域)領域に目を向けると、2008 年打ち上げの Fermi 衛星(米)の観測により近年急速に進展が進んでおり、従来のバンド関数のような単純なモデルでは説明できない、全く別の超過成分の存在を明らかにしている(例えば Ryde et al. 2010)。特に最近ではシンクロトロン衝撃波モデルに代わり、GRB ジェット根元の光学的に厚い領域(光球)から黒体放射が出ているとする光球モデル(Meszáros et al. 2002)が台頭するなど混沌とした状況である。

一方で 10 keV 以下の X 線観測はというと、1990 年代後半の Beppo-SAX 衛星(伊)や 2000 年に打ち上げられた HETE2 衛星(日米仏)以降空白の時代が続いている。Fermi で見た GeV 超過成分は X 線領域から続いて超過している傾向があり、黒体放射かシンクロトロン放射か、あるいはその重ね合わせかを見極めるために Fermi が活躍している今こそ、X 線領域の観測は重要な価値をもっていると言える。さらに Beppo-SAX と HETE2 は X 線フラッシュ(XRF)と呼ばれる、X 線に放射のピークをもつ(ほとんどガンマ線に放射のない)突発現象の存在を明らかにした(Sakamoto et al. 2005)。XRF は赤方偏移にある GRB、GRB ジェットを正面からでなく少し横から観測したもの(Yamazaki et al. 2002)、GRB とはジェット構造自体が全く異なるなど、様々な説があり、ほとんど理解が進んでいない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、第一にこれまでほとんど着目されてこなかった X 線に主眼を置いた超広帯域 X・ガンマ観測を通じ、依然謎に包まれている宇宙最大の爆発現象であるガンマ線バースト(GRB)初期放射の発生・放射メカニズムに迫ることにある。そして第二に GRB の X 線領域の観測を実現するため、高性能 LaBr₃(Ce) シンチレータを宇宙機器として世界で初めて開発、国際宇宙ステーション実験高エネルギー電子・ガンマ線観測装置 CALET に搭載して世界の先達、将来観測の礎とすることである。

3. 研究の方法

本研究は、これまで観測が進んでいない GRB の X 線領域での観測を強く推進するものであり、方法・内容は、大きく 2 つの柱に分けられる。一つは、現在活躍中の MAXI の機上較正、速報の強化を行いながら、他衛星のデータと合わせてガンマ線バースト初期放射の X 線領域の観測的研究を進めることである。もう一つは当初 2014 年(平成 26 年)夏打ち上げ予定であった CALET 計画に搭載するガンマ線バーストモニター(CGBM)の検出器開発、地上較正をすすめる。そして打ち上げ後に、日本発の国際宇宙ステーション実験 MAXI と CALET による、GRB の超広域 X 線・ガンマ線同時観測(0.5 keV{ 1 TeV)を実現することである。

超広帯域観測、特に X 線に主眼をおいた観測を行い、GRB 初期放射の放射機構に迫る。観測手段として、日本発の X・ガンマ線観測装置である国際宇宙ステーション「きぼう」曝露部搭載の MAXI と CALET を組み合わせる。XRF は約 10 keV 以下に放射エネルギーのピークをもつため、約 10 keV 以下に感度のある広視野観測装置が不可欠である。MAXI は活躍している全天監視型装置の中で 0.5—30 keV の X 線に感度をもち、約 2 年間の運用で GRB 11 例と XRF 候補 10 例を観測するなど、XRF と GRB の両方を検出する能力をもつ。一方、CALET は MAXI に続く曝露部第 2 期利用として 2014 年夏に打ち上げが予定される高エネルギー電子・ガンマ線観測装置であるが、GRB の GeV ガンマ線領域(1 GeV—1 TeV)の観測をサポートするために、我々が開発中の 10 keV 以下の X 線に感度をもち GRB モニタ(CGBM; 5 keV{20 MeV)を搭載する。したがって、同時に受けた GRB について実 0.5 keV—1 TeV までの超広帯域同時観測が可能である。MAXI、CALET 連携観測を通じ、研究期間中に以下の 3 つを観測的に明らかにする。

1. X 線フラッシュの系統的観測:

これまで行われていない XRF の統計的な性質を議論できる 100 個近いサンプルを MAXI と CALET で得るとともに、通常の GRB や GeV 放射が検出された GRB との観測的な相違を明らかにする。発生した天空座標や総放射エネルギー量(フルエンス)や放射ピークのエネルギーの統計的な性質(logN{logS 関係など)から、XRF が通常の GRB に比べて空間的に一様に分布するのか? GRB ジェットの形状に違いがあるのか? についての有益な情報を得られる。

2. X 線フラッシュの赤方偏移の決定と高赤方偏移仮説の検証:

MAXI で位置決定された XRF を木曾観測所の約 1 度のユニークな広視野望遠鏡や

Swift/UVOT で観測し、可視光対応天体の探査を行う。見つかった場合には大望遠鏡による分光観測をよびかけて吸収線などの検出から XRF の赤方偏移を決定する。過去に赤方偏移が決定している XRF は 2 つのみであり、極めて少ない。赤方偏移が分かれば、放射エネルギーのピークと全放射エネルギー量/ピーク光度の間の相関関係が検証できる。

3. 広帯域 X・ガンマ線観測による通常のガンマ線バーストの X 線領域での超過成分の有無の検証:

広帯域データを用いて、MAXI と CALET の X 線領域で観測された GRB がバンド関数と黒体放射のどちらでよく説明されるか? の検証を行う。また、Fermi GeV ガンマ線データと合わせて X 線領域に超過成分がないかを検証し、理論モデルとの比較から GRB の放射機構に制限を与える。

本研究は、GRB の放射メカニズムやジェット構造に迫る本質的問題であり、天文学的に重要であることを強調しておく。

4. 研究成果

本科研費により、CALET 実験の第 2 の科学的観測装置であるガンマ線バーストモニタ (CGBM) の開発を青山学院大学と名古屋大学と共同で進め、地上較正、打ち上げ、運用、初期成果創出まで行った。CGBM はシンチレータと光電子増倍管という組み合わせでガンマ線検出器としてはシンプルなものである。2 つの検出器で硬 X 線モニタ (HXM) と軟ガンマ線モニタ (SGM) の 2 つで構成され、7 keV-20 MeV という X 線から軟ガンマ線領域をカバーする。HXM に使用されている、LaBr3(Ce) というシンチレーション検出器は宇宙天体観測用として初めて搭載され、日本では製造していないことから、海外の製造会社と協力して開発を進めた。CALET 打ち上げは、2015 年 8 月 19 日であり、振動や熱真空などの過酷な環境に耐え抜き、10 keV 以下の X 線領域まで検出できることが確認された。2017 年 4 月現在も大きな問題なく、動作を続けている。これら軌道上データは今後、LaBr3(Ce) を使用したい世界の研究者にとって有益な情報となると期待される。

CGBM は 2015 年 8 月 19 日の打ち上げから、10 月初旬に本格的観測を開始した。2017 年 3 月現在、すでに 61 個の GRB の検出に成功しており、うち 4 個の GRB は MAXI と同期がとれている。中には CGBM で観測される 34 秒前から MAXI の軟 X 線で強い放射がみられるもの (GRB 160107A) や、CALET の主検出器であるカロリメータを構成しているセンサで反応が見られるものがあり、GeV ガンマ線検出の可能性がある (GRB 160625B)。これまでの GRB では X 線にバンド関数からの超過成分は検出されていない。これらを含めて、物理学年会の宇宙線宇宙物理領域シンポジウムにおいて、CGBM の初期成果について講演を行った。

また、重力波が本科研費期間に発見され、世界中で大きな話題となっている。CGBM は日本独自で X・ガンマ線対応天体を発見できる数少ない観測装置であり、観測期間中に候補イベントを含め、4 つの重力波イベントがあった。そのうち、GW 151226 についてはカロリメータと CGBM で視野に入った時間があり、検出はできなかったが、X 線ガンマ線でのフラックスの上限値を報告した (Adriani et al. 2016)。得られている距離 440 Mpc を仮定すると、上限値から計算される光度は、典型的な“短い”ガンマ線バーストより有意に小さいことが分かった。重力波イベントの位置の誤差は非常に大きく全体がカバーできていないためか、ブラックホール同士の合体で電磁波がでないのか、それとも発生した際の相対論的ジェットが我々観測者の方向を向いていないためなのか、中性子星同士の合体における観測も含めて、今後の継続的かつ詳細な追観測が要求される。

本研究のもう一つの MAXI (2-20 keV) による X 線観測領域も進めてきた。MAXI では速報体制が整備され (Negoro et al. 2016)、位置情報の提供についても改善されてきた。また、国際協力で Swift 衛星 (米) との協力を進め、追観測が行われた。Swift 衛星は、狭視野の X 線望遠鏡 (XRT) と紫外線・可視光望遠鏡 (UVOT) を搭載し、対応天体の探査に適している。MAXI の速報情報を国際連携チームに連絡することで、MAXI の決定位置を Swift でカバーして観測を行う体制が整備された。本科研費期間 (平成 24 年度から 29 年度) 中に 64 個の GRB・XRF を検出し、うち 49 個が MAXI で最も位置決定精度のよい検出 (32 個が MAXI 単独の検出) であった。Swift 衛星による MAXI GRB フォローアップは、23 個行われ、実に 15 個について X 線対応天体 (候補含む) の検出に成功した。ただし、そのうち赤方偏移が決まったのは GRB 150518A の $z=0.256$ のみであった。ただし、MAXI で検出した候補のうち、X 線残光が検出されず、非常にソフトなものがあり、このようなイベントはもしかすると XRF と異なる新種族の X 線天体 (MUSST: MAXI Unidentified Short Soft Transient と呼ぶ) なのかもしれない。

MAXI でとらえられた 35 個の GRB については Serino et al. (2014) にまとめられた。IMAXI で検出された GRB の 2/3 は他の検出器で検出されず、XRF かもしくは、銀河系内のトランジェントによる混入かもしれない。logN-logP 関係も比較的近傍に存在することが示唆されている。「すざく」衛星搭載硬 X 線検出器に搭載された広帯域全天モニタ (WAM) の 50-5000 keV のデータを用いて、約 1400 個におよぶ GRB のサンプルの統計的解析を進め、継続時間 (Ohmori et al. 2016) やレビュー論文 (Yamaoka et al. 2017) をまとめた。コンプトン衛星 BATSE 検出器などの過去の結果と矛盾のない結果となっている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 16 件)

① K. Yamaoka(32人中1番目), M. Ohno, M. S. Tashiro et al., Suzaku Wide-band All-sky Monitor (WAM) Observations of GRBs and SGRs, Publication of the Astronomical Society Japan, 査読有, in press, 2017, DOI: 10.1093/pasj/psx026

② O. Adriani, Y. Akaike, K. Yamaoka(92人中88番目) et al., CALET Upper Limits on X-ray Gamma-Ray Counterpart of GW 151226, The Astrophysical Journal Letters, 査読有, Vol. 829, Issue 1, 2016, pp.20-24, DOI: 10.3847/2041-8205/920/1/L20

③ N. Ohmori, K. Yamaoka(28人中2番目), M. Ohno, et al., Suzaku Wide-band All-sky Monitor measurements of duration distribution of gamma-ray bursts, Publications of the Astronomical Society Japan, 査読有, Vol. 68, Issue SP1, 2016, pp. S30-S40, DOI: 10.1093/pasj/psw009

④ M. Serino, T. Sakamoto, N. Kawai, K. Yamaoka (43人中40番目) et al., MAXI observations of gamma-ray bursts, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, Vol. 66, Issue 5, 2014, pp. 87-100, DOI: 10.1093/pasj/psu063

⑤ K. Yamaoka (17人中1番目), A. Yoshida, T. Sakamoto, et al., The CALET Gamma-ray Burst Monitor (CGBM), 7th Huntsville Gamma-Ray Burst Symposium, 査読有, 2013, paper 41 in eConf Proceedings C1304143

[学会発表] (計 30 件)

① 山岡和貴、CALET-GBM の初期成果、日本物理学会第 72 回年次大会(招待講演)、2017 年 3 月 19 日、大阪大学豊中キャンパス(大阪府・豊中市)

② K. Yamaoka, In-Orbit Performance of the CALET Gamma-ray Burst Monitor, Eighth Huntsville Gamma-Ray Burst Symposium, 2016 年 10 月, Hutton Hotel (Huntsville, USA)

③ K. Yamaoka, CALET Gamma-ray Burst Monitor on the ISS, Fifth International Fermi Symposium, 2014 年 10 月 20 日~24 日, 名古屋大学(愛知県・名古屋市)

④ K. Yamaoka, CALET on the ISS, Ioffe Workshop on GRBs and other transient sources: 20 Years of Konus-Wind Experiment, 2014 年 9 月 26 日, Ioffe Institute(St. Petersburg, Russia)

⑤ K. Yamaoka, 8-year soft gamma-ray all-sky monitoring with Suzaku wide-band all-sky monitor, Suzaku-MAXI conference 2014, 2014 年 2 月 21 日、愛媛大学城北キャンパス(愛媛県・松山市)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

なし

○取得状況 (計 0 件)

なし

[その他]

ホームページ等

http://www.isee.nagoya-u.ac.jp/~yamaoka/kakenhi/wakateA_grb/

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山岡 和貴 (YAMAOKA, Kazutaka)

名古屋大学・大学院理学研究科・特任准教授

研究者番号：00365016

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

吉田 篤正 (YOSHIDA Atsumasa)

坂本 貴紀 (SAKAMOTO Takanori)

大森 法輔 (OHMORI Norisuke)